密集都市地域における老朽住宅耐震補強戦略の提案

主查 中島 正愛*1 委員 浅野 幸一郎*2, 三谷 勲*3, 井戸田 秀樹*4, 諸岡 繁洋*5, 金尾 伊織*6

都市部に建つ古い住宅に,投資効果の高い耐震補強法が急務な実情を踏まえ,安価なクッションや古タイヤにより住宅同士 を互いに連結する「建物連結補強」を提案する。安価な連結部材を実現するためには片側接着が必至であり,連結部材(部分) に遊隙がある状態を考えなければならないが,これによって振動系は強非線形性を持つ。本研究では,この非線形性を震動台 実験により確認するとともに,その振動状態を理論的に等価線形化した。等価線形化式は,連結部材の剛性と粘性減衰,遊隙 の長さの関数であり,その妥当性を数値解析結果との照合によって検証した。さらに,現実の連結部材として利用可能な安価 な材料についても検討を加えた。

> キーワード: 1)耐震補強, 2)連結, 3)隙間とたるみ, 4)震動台実験, 5)共振曲線, 6)等価線形化

RETROFIT STRATEGIES FOR SEISMICALLY VULNERABLE HOUSES BUILT IN URBAN AREAS

Ch. Masayoshi Nakashima

Mem. Kouichiro Asano, Isao Mitani, Hideki Idota, Shigehiro Morooka and Iori Kanao

In consideration of strong needs for cost-effective seismic retrofit for old houses built in urban areas, proposed is a type of retrofit techniques in which detached houses are linked together by inexpensive materials like ropes, cushions, and others. A series of shaking table tests were conducted with the type of linking elements, and type of motions as major test variables. Although the linking elements exhibit strong nonlinearity because of gaps, slacks, etc., it is noted that they could be approximated to equivalent linear elements. Analytic formulations are presented for the equivalent linearization of the linked systems, and equivalent elastic stiffness and viscous damping ratios are derived as a unified function of the stiffness of the linked systems, stiffness of the linking element, and length of the gap or the slack. The effectiveness of the analytical expressions was demonstrated in comparison with the results obtained numerically. Discussion was also extended to the inexpensive materials that may be applicable in real implementation of the system proposed in this study.

1. はじめに

兵庫県南部地震において露見した多岐にわたる被害のな かでも、都市密集地域における古い住宅の倒壊を含む多数の 被害は、その人的被害に対する責任の重大さにおいて、この 地震からわれわれが学ぶべき最大の教訓であった¹⁾。この被 害から、①戦後の復興期から高度経済成長初期に建設された 数多くの建築ストックが日本中に残存していること、②これ ら住宅は地震に対してきわめて脆弱であること、③日本のほ ぼ全域は、兵庫県南部地震規模の強震動を受ける可能性があ ること、④抜本的リニューアルも含めてこれら建築ストック の耐震安全性を向上させない限り、兵庫県南部地震と同じ惨 事が繰り返されるに違いないことが露わになった。

しかし兵庫県南部地震から8年が経たいまも、都市密集地

域に数多く建つ古い住宅に対する耐震リニューアルは極く 限られている^{2)~4)}。兵庫県南部地震から半年後に、「建築 物の耐震改修の促進に関する法律」が公布されたが、平成 13年2月に国土交通省住宅局が実施した調査⁵⁾によれば、 地方自治体等が保有する特定建築物においても、耐震改修が 必要と判定された建物に対する改修率は約30%に留まり、民 間保有ともなると耐震改修の前段となる耐震診断でも4%を 切っている。大規模な特定建築物においてすらこの状況で、 ましてや住宅ともなると、結局は個人の決断に委ねられ、耐 震改修への動きは著しく鈍い。その原因として以下が挙げら れる。

(1)耐震改修に費用がかかりすぎる。地方自治体の一部が提示 している耐震改修に付随する諸優遇措置が必ずしも機能

*1 京都大学 教授	*2 関西大学	教授	*3 神戸大学	教授
*4 名古屋工業大学 助教	教授 *5 京都大学	講師	*6 京都大学	助手

していない事実もそれを裏づけている。

- (2)建物の内部をいじる耐震改修は,改修間の強制移動などさ まざまな障害を産み出し,所有者や住民の理解が得られな い。
- (3)現行の耐震改修は、改修した後の安全性が、現行の設計基準を用いて新しく建設する建物に求める安全性と同等であることを要求しているが、築後30年以上を経た古い住宅にそれほど高い安全性を要求することは、必ずしも現実的でない。

上記(1)~(3)の問題点を解決する提案の一つとして,本論 では,住宅が軒を並べつつ密集している地区を対象に,これ を個々の住宅ではなく「建物群」としてとらえ,建物群とし ての耐震補強を考える。具体的には,住宅同士を互いに連結 する「建物連結補強」を提案する。

建物と建物を互いに連結し振動位相差を利用して地震動 のエネルギーを吸収しようとする連結耐震については,現在 までさまざまな角度から研究が展開され,また実構造物にも 適用されている^{8)~16)}。これら既往の研究や実施例で扱われ ている連結部材には,弾塑性履歴特性を有するもの^{11)~13)}, 粘性ダンパーや弾塑性ダンパー,あるいはそれらと弾性バネ の組み合わせ^{8)~10),14),15)}があり,連結部材の最適値や最適 解の導出にまで研究が進んでいる。しかしながら,これらの 特性を有する連結部材を本論が対象とする老朽化住宅が密 集する地域に適用することは,上記問題(1)コスト,(2)施工 性から非常に困難であると言わざるを得ない。

そこで、本論ではこれらの問題(1)~(3)に対する回答とし て、隣棟間をロープで繋いだり、隣棟間の隙間に安価なクッ ション(例えば古タイヤ、ウレタン塊、空気バネなど)を差 し込むことによって、建物間の揺れに相関を持たせ、その位 相差によって減衰効果を発揮させる耐震改修方法を考える。 この種の補強で耐震性能が格段に向上するかどうかは疑わ しいが、投資効果に対してそれなりの効果が認められれば、 上記問題(3)に対する議論を具体化することが可能となる。

本論では、クッション状材料等の取り付けについては、図 1-1 のように、片側の棟にのみに接着という方法を考える。 両棟に接着するためには隣棟間の距離とクッション材料の 長さ(幅)が等しくなければならないし、また押しつけられ たときには問題がなくても引っ張られるときにははがれる 危険がある。このように、一般に引張力を受ける材料への接 着は難しく、実際の製作や施工を考えるなら、片側接着には 大きな意味がある。ただ片側接着では、図1-1に見られるよ うに、両棟が互いに近づく場合には連結効果を持つが、互い に離れる場合に2つの棟は独立して揺れる。また連結にロー プを用いると、クッションとは逆に、引張には抵抗するが建 物間が互いに近づく場合には無抵抗となる。簡便な施工を考 えると、ロープのたるみやクッション材と建物に隙間(本論 ではこのたるみ,隙間のことを遊隙と呼ぶ)が生じることも 避けられない。これら連結系の挙動はいずれも強非線形性を 呈し,また複数建物が連結されたときの揺れは一層複雑にな る。

そこで、本論は、このような「建物連結補強」を実現する ための端緒として、遊隙を持つ部材の連結によって期待でき る応答低減効果を、一連の震動台実験によって検証するとと もに、連結効果の定性的傾向を数値解析とも併せて分析する。



2. 連結建物群の非線形性

建物を水平方向に揺れる線形1自由度系と考え,それをゴ ムやクッション材のような引張あるいは圧縮のみの一方向 にしか抵抗しない部材で剛な壁に連結した状態を図 2-1 に示 す。両方向に抵抗する連結部材を用いた場合、その特性が線 形であれば、左右どちらの変位が生じても同じだけの反力を 連結部材より受けるので,建物系としての応答も線形となる。 一方,本論で扱うこれら片側だけに抵抗する部材を用いた場 合,図2-1に示すように,系としての剛性は建物変位が遊隙 の大きさを超えるかどうかで変わるという非線形性が生じ る。複数の建物を連結する場合、建物が連結部材から受ける 抵抗力の変化は,建物間の相対変位と遊隙の大きさに左右さ れ,時刻歴応答解析を行う場合には,連結部材による剛性変 化の時刻を正確に求めなければならない。本論では、実験結 果を検証するため、この非線形性を考慮できる地震応答解析 コードを整備した。付録にその概要を示す。また通常の線形 バネによる解析と区別するため、本論ではこの解析を遊隙部 材振動解析と呼ぶ。



-206-

3. 連結建物群震動台実験

実験の概要を以下に示す。震動台上に,図 3-1 に示すよう な建物群を想定した複数の縮小建物モデルを配置し加振し た。多数の実験ケース(後述)に対する実験を効率よく行う ため,6つの建物モデルを2×3に配置し,各建物モデルの 振動特性および連結部材を適時変更している。すべての実験 ケースにおいて,図 3-1の矢印方向に加振した。



図 3-1 建物群を想定した複数の縮小建物モデル

3.1 建物モデルと連結部材

実験に用いた建物モデルを図 3-2 に示す。建物として想定 する住宅の一次固有周期がおよそ 0.5 秒であることを模した 1 質点系である。建物モデルの中央に設けた滑車つき柱には, 水平方向には抵抗することなく鉛直荷重を支持させている。

建物モデルの剛性は、4 面に張り巡らせた PC 鋼棒の本数 を、1 面につき3本、4本、5本(各計12本、16本、20本) と変えることによって調整した。また、建物モデルの質量は、 天板上に載せたおもりの枚数により調節した。これら剛性と 質量を適宜調整することにより、指定された固有振動数を持 つように建物モデルを変更できるが、本論では、質量を一定 (100kg)にし、剛性を変化させた建物モデルを実験対象とし て、それぞれ M1、M2、M3(PC 鋼棒の本数が1面につき、 それぞれ3本、4本、5本)と呼ぶ。また、図には示してい ないが、実験によっては、ブレース材を装着することによっ て水平方向剛性を飛躍的に高め、建物モデルを固定境界とし て用いた。建物モデルの振動特性はモデル変更毎に測定して おり、その詳細は4.1節に記す。

連結部材には、ロープや古タイヤ、クッション材等の身近 で安価な材料を模した部材として、ゴム、ウレタン、および 空気入れ(ステップポンプ)を用いた。ゴムは引張、ウレタ ン、空気入れは圧縮に対して抵抗する部材である。連結部材 間の遊隙による影響を見るため、天板上でスライドできる剛 なアームの先端に連結部材は取り付けた。比較の対象として、 圧縮・引張に等しく抵抗する線形部材である弾性バネも採用 した。これら連結部材の寸法・個数は、建物(モデル)と同 程度の剛性を連結部材がもつとき、応答低減効果が発揮され やすいという予備解析結果のより定めた。連結部材の剛性や 減衰特性による影響を検討するため、バネ、ゴム、ウレタン に関しては2種類、合計4部材7種類の連結部材を用いた。 連結部材とその表記を表 3-1 に示す。



3.2 加振方法

加振方法を以下にまとめる。入力レベルは, 試験体の応答 が概ね弾性範囲に収まるように決めている。

- ①自由振動:人力により加振した後,自由振動させる。各建物モデルと各連結部材の特性を調べる。(4.1節参照)
- ②スウィープ加振:1.0Hz~4.0Hzの間を低周波側から0.1Hz 刻みで、入力加速度15galで加振する。安定した共振曲 線を得るために、周波数ごとに正弦波を20波分入力す る。連結の有無による共振曲線の変化を調べる。
- ③正弦波入力:②のスウィープ加振の結果を参照しながら, 共振点付近の振動数に対して,入力加速度15galの正弦 波を50波分入力し,時刻歴応答の詳細を測定する。
- ④地震波入力: JMA Kobe-NS 波, Takatori-FN 波, El Centro-NS 波, BCJ-L2 波(模擬地震波)の4種類の地震波を入力し, 非定常応答時の連結効果を調べる。ただし、各地震波と も最大入力加速度が100gal になるように調整している。

3.3 計測器と計測方法

応答時刻歴の記録は、図 3-2 に示すように建物モデルの天 板上に設置した加速度計と、ターゲットを画像処理により追 跡する画像処理変位計測装置によって得た。また一部の実験 でレーザー変位計を併用し、画像処理変位計測装置の精度を 確認した。各計測器の設置概要と計測対象を以下にまとめる。 (i)加速度計:建物モデル天板上の両端に加振方向およびその

直交方向に合わせて,各方向に2つずつ取り付けた。全 ての加振に対して加速度を計測した。

(ii)画像処理変位計測装置:建物モデル天板上の対角 2 箇所 にボール状のターゲットを取り付け,そのターゲットを 震動台上部に設置したビデオカメラで追い,建物モデル の変位を計測した。この画像処理装置による最大変位の 誤差は、レーザー変位計計測との比較から、振幅によら ず 1mm 以下となっている。この装置は記録可能時間が 最長 30 秒であるため、①自由振動、③正弦波入力、④ 地震波入力に対してだけ用いた。

表 3-1 連結部材一覧

	symbol		
spring		single	S1
Sping		double	S2
		single	R1
rubber		double	R2
urethane		large	U1
		small	U2
step pump			Ρ

表 3-2 連結パターン

Type1	Pattern	01	02	03	04	05	06	
	link element	S1	R1	R2	U1	U2	Ρ	
Tuno2	Pattern	07	08	09	10	11	12	
Typez	link element	S1	R1	R2	Ü1	U2	Ρ	
Turne?	Pattern	13	14	15	16	17	18	19
1 ype3	link element	S1	S2	R1	R2	U1	U2	Ρ
Туре4	Pattern	20	21	22	23	24		
	link element	S1	S2	R2	U1	Ρ		
Type5	Pattern	25	26	27	28	29		
	link element	S1	S2	R2	U1	Ρ		
Туре6	Pattern	30	31	32	33	34		
	link element	S1	S2	R2	UI	P		



3.4 実験パラメータ

実験パラメータを以下に示す。

(1) 連結部材の遊隙

遊隙の影響を見るため、図 3-3 に示すような隙間やたるみ

を設けた。これをクリアランス(CL)と呼び,0,5,10, 15,20mmの5段階を設定した。CL0は、遊隙がない状態、 つまり隙間やたるみなく連結された状態である。クリアラン スの最大値,CL20は、建物モデルがほぼ弾性的に応答する 振幅の最大値が、20~30mmであることを考慮して決めた。 (2) 群モデルの並び方

最大3棟を一列に配置した場合,連結棟数,建物モデル剛 性による並びの違い,連結部材の種類を組み合わせると,34 の連結パターンがあり,それらは下記のように6タイプに分 けられる。表 3-2 中の S1 等の記号は,表 3-1 で定義した連 結部材を示す。

これらの連結タイプとその実験目的は以下のようにまと められる。

- ・両側固定連結(Type1):1棟の建物モデルM3を,ブレースで固定した両隣のモデルに連結する。モデルの両側に隙間なく連結部材を挿入すると、必ず片方の連結部材が抵抗するので、連結部材が線形であれば系としても線形となる。これを利用して、連結部材の剛性と減衰係数を求める。(4.1節参照)
- ・片側固定連結(Type2):1棟の建物モデル M3 を,ブレー スで固定した一方の隣のモデルに連結し,他方は自由に する。非線形挙動の最小単位となる。
- ・2 棟連結(Type3): 剛性の異なる(固有周期の異なる)2 棟の建物モデル M1 および M3 を連結する。群モデルと しての最小単位となる。
- ・3 棟連結(Type4,5,6):剛性の異なる(固有周期の異なる)
 3 棟の建物モデルを連結する。モデルの並び方を,M1 M2-M3(Type4), M1-M3-M2(Type5), M2-M1
 -M3(Type6)の3タイプとし、並び方の影響を見る最小単位として用いる。

4. 実験結果及び考察

複数の連結部材を用いたが,連結応答は、これら連結部材 の剛性,減衰、クリアランスに支配される。本章では、建物 モデルと連結部材の振動特性を示した後、連結部材の剛性, 減衰、クリアランスが連結系の振動に与える影響を考察する。

4.1 建物モデルおよび連結部材の振動特性

建物モデル自身の振動特性は, Type1 においてブレースで 固定された両隣のモデルに連結部材が振動時に接触しない ようにアームを充分縮め,単独で自由振動させた結果から算 出した(図 4-1(a)に示す非連結モデル)。予め測定しておい たモデルの質量 *m* と,自由振動時刻歴応答変位から得られ る固有周期 *T* より,建物モデルの剛性 *k* は次のように求めら れる。

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \Rightarrow k = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \cdot m \tag{1}$$

また,自由振動時刻歴応答変位から,建物モデルの減衰定数 h もわかるので,建物モデルの減衰係数 c は次のように求められる。

$$h = \frac{c}{2\omega m} = \frac{T \cdot c}{4\pi m} \Rightarrow c = \frac{4\pi m h}{T}$$
(2)

このようにして得られた建物モデルの基本特性を表4-1に 示す。水平剛性を支配する PC 鋼棒の本数により建物モデル の名称を決めているが,建物モデル変更毎の取り付けボルト 固定度や,下部鋼板と滑車間の摩擦などの影響により,固有 振動数,減衰定数ともに多少ばらついている。

一方,連結部材については、同じ連結部材を剛なアームの 先端にボルトで取り外し,取り付けるだけであるから、その 特性は変わらない。したがって,実験期間中に一度だけ計測 した。連結部材の剛性および減衰係数算出は以下の通りであ る。

Type1 の連結部材のクリアランスを 0 にした場合(図 4-1(b)),必ず片方の連結部材が抵抗するので,連結部材を 線形とすれば建物系も線形となる。よって,この状態におけ る固有周期 T'と,非連結モデルの自由振動時刻歴応答変位か ら得られた建物モデルの剛性 k より,連結部材の剛性 k_c は次 のように求められる。

$$T' = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k + k_c}} \Rightarrow k_c = \left\{ \left(\frac{2\pi}{T'}\right)^2 \cdot m \right\} - k$$
(3)

また,同時にこの時刻歴から減衰定数 h'もわかるので,連 結部材の減衰係数 c_cは以下のように求められる。

$$h' = \frac{c + c_c}{2\omega' m} = \frac{T' \cdot (c + c_c)}{4\pi m} \Rightarrow c_c = \frac{4\pi m h'}{T'} - c \tag{4}$$

得られた連結部材の基本特性を表 4-2 に示す。本実験で用 いた連結部材の剛性は建物モデルのそれとおおむね同程度 である。

なお,表4-2 に示す連結時における固有周期 T',減衰定数 h'は、クリアランス(CL)の最大値の 1/2 である 10mm の強制 変位を与えた後の自由振動時刻歴応答変位より求めている。 減衰特性については、振幅依存性が若干認められ、振幅レベ ルによって多少異なる値を示した。表4-2 に示す減衰係数は、 10mm 程度の振幅レベルに対するものであることに留意され たい。



表 4-1 建物モデル特性

ouilding model	stiffness	natural period	damping ratio
Sullaing model	(kN/m)	(sec)	(%)
M1	8.73~9.90	0.55~0.62	1.20~5.80
M2	11.6~13.4	0.47~0.53	0.98~2.90
M3	12.6~17.4	0.43~0.52	1 10~2 20

表 4-2 連結部材特性

link element	stiffness (kN/m)	damping coefficien (kN•sec/m)		
S1	7.94	0.0098		
S2	15.8	0.019		
R1	3.92	0.094		
R2	13.9	0.25		
U1	9.02	0.11		
U2	15.4	0.23		
P	2 55	0.042		

4.2 2棟連結の共振曲線

2棟連結において、部材のクリアランス・剛性を変化させ ると、各建物モデルの共振曲線は規則的に変化する。本節で は、連結した2棟の建物モデルのうち、剛性の高い建物モデ ル(M3)を高次側モデル、剛性の低い建物モデル(M1)を低次側 モデルと呼び、以下の考察を進める。

(1) クリアランス変化による共振曲線の変化

同一の連結部材を用い、クリアランスのみを変化させた連 結系の加速度共振曲線について考察する。例として、連結部 材に二重ゴム(R2)を用いた場合の、非連結時と各クリアラン ス(CL)における共振曲線の変化を図 4-2 に示す。図中、マー カーが実験結果、実線が実験と同じ条件による遊隙連結振動 解析結果を示している。解析結果は実験結果とよい対応を示 し、実験結果の妥当性と数値解析手法の有効性が確認できる。

クリアランスを徐々に狭めていくと、高次側モデル(M3) の共振曲線はピーク値を2つ持ち始め、低次側モデル(M1) の共振曲線の下にしだいに吸収され、クリアランスが0の場 合には共振曲線が重なるように(正確には同一の固有振動数 を持つように)なる。低次側モデル(M1)の共振周波数および 共振ピーク値は、高次側モデル(M3)のそれらに比べ、この変 化の過程であまり変化しない。TMD等の特性値を設定する ときには、複数の共振ピーク値を有する共振曲線において、 最大のピーク値が最も小さくなる特性値を最適値と考える ことが多い^{8)~10),14),15)}。本実験では、低次側モデルの共振 ピーク値があまり変わらないので、TMD等の最適値の考え 方にならえば、高次側モデルの2つの共振ピーク値が同じ値 をとるとき、連結による応答低減効果が最も高くなる。



図 4-3 連結部材剛性による共振曲線の変化(CL5)

(2) 剛性変化による共振曲線の変化

クリアランスを一定にし、剛性を変化させた場合の共振曲 線の変化を考察する。同一連結部材については、表 3-1 に示 すように、同一連結部材については、一重・二重の2種類の 剛性の組み合わせしかないので、ここでは剛性のみに着目し、 空気入れ(P:2.55kN/m)、一重ゴム(R1:3.92kN/m)およ び二重ゴム(R2:13.9kN)の共振曲線を図4-3 に示す。いず れの場合もクリアランスは 5mm である。連結部材の剛性が 高くなると、高次側モデル(M3)の共振曲線はピーク値を2つ 持ち始め、低次側モデル(M1)の共振曲線の下に吸収されてい くような変化をしていることがわかる。このような変化は、 連結部材のクリアランスを次第に小さくしたときの変化に よく似ている。

なお,4つの共振曲線の共振ピーク値が違うが,これは連 結部材が異なり,剛性以外の特性が同一ではないためである。



図 4-4 解析モデル



(3) 線形バネ連結剛性変化による共振曲線の変化

(1)および(2)で示したクリアランスおよび剛性による共振 曲線の変化を考察するため,2つの建物モデル(M1,M3)を線 形バネで連結し,その剛性を変化させた場合の共振曲線の変 化を検討する。ここではクリアランスと剛性による変化を詳 細に調べるため,連結部材は減衰がないと仮定する。連結部 材の減衰による影響については次項で述べる。解析モデルは 図 4-4 に示す通りで,Aが高次側モデル(M3),Bが低次側モ デル(M1)である。それぞれの剛性は実験により求められた値 を用いて,減衰に関してはいずれも減衰定数として2%の値 を与えている。連結バネの剛性 k 。を実験に用いた連結部材 の剛性と同程度の0.0kN/m~10.0kN/m と変化させたときの, 幾つかの剛性値に対する共振曲線を図 4-5 に示す。

低次側モデルの共振曲線はほとんど変わらないが,高次側 モデルの共振曲線は連結バネ剛性を徐々に高めていくと,2 つのピーク値を持ち始め,それらがほとんど同じ値になる状 態を経て,最後には低次側モデルの共振曲線に吸収されてい るような変遷を辿る。この線形バネ剛性による共振曲線の変 化は,先に示した遊隙部材のクリアランスおよび剛性による 共振曲線の変化と酷似している。つまり,クリアランスを小 さくすること,および,連結部材の剛性を高めることは,線 形バネの剛性を高めることと同様の効果を系に与えている。 このことは,遊隙部材のクリアランスおよび剛性を等価な線 形パネ剛性に置き換えることができる可能性を示している。 また,高次側モデルの2つのピーク値が同じになる状態を 「二分化」と呼ぶこととすると,高次モデルの応答はこの二 分化の状態で最も低減すると言える。

(4) 連結部材の減衰

次に,連結部材の減衰が共振曲線の応答性状に与える影響 を検討する。一例として,減衰特性の高いウレタン大(U2) で2棟を連結し,クリアランスのみを変化させた場合の実験 結果を図 4-6 に示す。共振曲線は前述と同様の傾向を示して いるが,減衰によるピーク値の変化は,図 4-5 で示した非減 衰線形バネ連結時の共振曲線と異なり,その違いは特に高次 側モデルの共振曲線が「二分化」する状態において最も顕著 に表れる。一方,両モデルの共振曲線が「一体化」する状態 においては,ピーク値の低減はほとんど見られない。これは, 共振曲線が「一体化」する状態では2つの建物モデルが同一 位相で振動しているため,連結部材の減衰効果がなくなるた めである。



図 4-7 3 棟連結の共振曲線(二重ゴム R2, CL0)

(5) 3 棟連結の場合

2 棟連結では「最大の応答低減を引き起こすのは、高次側 モデルの共振曲線が二分化する段階」であると述べた。3棟 連結になると、モデルの並び方が新たなパラメータとして加 わってくるために、並び方により「二分化」を呈する時点で のクリアランスの大きさが異なってくる。3棟連結の3つの 並びタイプである Type4(M1-M2-M3), Type5(M1-M3-M2)及び Type6(M2-M1-M3)において, 一重ゴム(R1)のクリ アランスを 0mm にした場合の共振曲線を図 4-7 に示す。最 も剛性の高い建物が真ん中に配置されているのが Type5 で あり、最も剛性の低い建物が真ん中に配置されているのが Type6 である。これら3つの並びタイプを比較すると、同じ クリアランス 0mm であるのにも関わらず Type6 のみが,す でに3棟の周期が一致した状態の共振曲線を呈している。ク リアランスを大きくしていくと、高次側の建物周期が二分化 する段階は、Type4 及び Type5 ではクリアランス 0mm 以下 (クッション材だと狭い隙間に詰め込んだ状態,ゴムだと引 っ張って繋げた状態に相当)であるのに対し、Type6 ではク

リアランス 10mm 前後である。このように,最も柔な建物 が内側に配された場合は,他の並びにおける最適連結よりも 「剛性の低い」あるいは「クリアランスの大きい」連結が最 適連結となると考えられる。



図 4-8 Kobe-NS 地震波応答 Type6 unlinked⇒CL0

4.3 地震波応答

地震波応答の例として, Type6 (3 棟連結) に Kobe-NS 波 を入力したときの時刻歴応答加速度を図 4-8 に示す。上図が 非連結時,下図がクリアランスを 0 としたバネで連結した結 果である。それぞれ右側に実験結果を,左側に遊隙部材振動 解析結果を示す。

解析による応答波形は,実験から得られた応答波形に似か よっており,連結による波形の変化の状況も解析は適切に追 跡している。応答最大値を見ても,実験値,解析値で大きな 誤差はなく、非連結時、連結時ともに解析は実験を概ねシミ ュレートできている。

地震波応答結果から,連結することによる地震応答の変化 を見ることはできるが,連結による効果を一般化することは 難しい。減衰機構を持つ部材であれば,4.2(4)で述べたよう に振動時の建物間位相差によりエネルギーが消費されるの で,その程度はともかく連結効果は必ずあると言える。しか しながら,とくに減衰がほとんどない連結部材では,ある建 物モデル (図 4-8 では M3)の応答は減るが,別の建物モデル (図 4-8 では M1)の応答は増えるなど,その応答特性の変化は 複雑である。このような,非定常応答に対する制御効果の複 雑さは,TMD 等の応答制御問題においても頻繁に見られる ところである。前節までに示したように,共振曲線等を用い て応答低減効果を検討することが,連結による応答低減の定 量的評価において現実的である。

4.4 実験結果のまとめ

片側にしか抵抗しないクッションやロープを,連結部材と その遊隙,建物の並び方をパラメータとした一連の震動台実 験を実施し,建物群としての応答性状に対する基本情報を得 た。2棟連結の共振曲線の変化により,少なくとも2棟連結 における連結部材のクリアランスと遊隙部材剛性を等価な 線形バネとして扱える可能性があることを示した。連結部材 の剛性,減衰,クリアランス,入力レベルの関数であると考 えられる,遊隙部材の等価剛性と等価粘性減衰については次 章に示す。

3 棟以上を連結した場合,それぞれの建物の共振曲線が 2 棟連結の場合と同じように,繋がれた低次側モデルの共振曲 線に引き込まれていく現象が見られるが,実験変数が多くな ったため,遊隙部材剛性,減衰,クリアランスの影響を規則 的に抽出することが難しく,詳細な検討には至らなかった。 しかしながら,遊隙連結解析は実験を精度良く再現すること がわかったので,3棟以上の連結系がもつ応答特性について は数値解析によるパラメトリックスタディーによって検討 したい。

5. 遊隙連結系の等価線形化と応答制御

前章までに、2棟連結の共振曲線の変化により、少なくと も 2 棟連結における連結部材のクリアランスと遊隙部材剛 性を等価な線形バネとして扱える可能性があることを示し た。

遊隙部材の剛性,減衰,及び遊隙を,等価な線形部材とし て置換することができれば,線形部材で連結された系(線形 連結系と称す)の応答制御問題として扱うことによって,遊 隙部材で連結された系(遊隙連結系と称す)の応答制御が可 能となる。そこで本章では,遊隙部材の等価線形剛性及び等 価粘性減衰を検討する。先ず,遊隙連結系の共振曲線式を誘 導する。次いで,共振曲線式と共振点における条件を用いて 共振点及び共振ピーク値を求め,それらが対応する等価線形 連結系を想定したうえで,遊隙部材の等価線形剛性と等価粘 性減衰を導き出す。

図 3-3 に示す繋ぎ方 Type1~3 を Type A~C として,以下 に示す。TypeA は両側を剛な壁と連結するモデルで,両側固 定連結系と称す。連結部の復元力特性は原点に対して対称型 となる。TypeB は片側を剛な壁と連結するモデルで,片側固 定連結系と称す。連結部の復元力特性は原点に対して非対称 型となる。TypeA, TypeB はいずれも TypeC の理論解を導く ための前段となる。TypeC はここで目的とする 2 棟連結系で あり,復元力特性は相対変位に依存した非対称型となる。



5.1 共振曲線式の誘導

TypeB 片側固定連結系を例にして共振曲線の誘導法を説明する。図 5-1 を参照すれば, TypeB の運動方程式は次式のように表わされる。

$$m_{A}\ddot{x}_{A} + c_{A}\dot{x}_{A} + k_{A}x_{A} + f\left(x_{A}, \dot{x}_{A}\right) = -m_{A}A\cos\omega t$$

$$(5)$$

$$\hbar \ddot{\mathcal{E}}\mathcal{L}, \quad f\left(x_{A}, \dot{x}_{A}\right) = \begin{cases} k_{c}\left(x_{A} - L\right) + c_{c}\dot{x}_{A} & \left(x_{A} > L\right) \\ 0 & \left(x_{A} \le L\right) \end{cases}$$

$$\begin{pmatrix} 以降 \omega_A^2 = \frac{k_A}{m_A}, 2h_A\omega_A = \frac{c_A}{m_A}, \omega_c^2 = \frac{k_c}{m_A}, 2h_c\omega_c = \frac{c_c}{m_A}, \\ \omega_B^2 = \frac{k_B}{m_B}, 2h_B\omega_B = \frac{c_B}{m_B}$$
 と定義する.

上式を解くために, 先ず, 定常振動解を

 $x_A(t) = R_A \sin(\omega t + \theta) + c_0$ (6) と仮定する。高調波成分及び分数調波成分は小さいものとし て基本調波成分のみを考えている。また、復元力特性が非対 称であることから, 直流分 c_0 を含んだ基本調波を仮定している。非線形要素への入力は式(6)により得られ, これを図示すると, 1 周期あたりの波形は図 5-2 上段のようになる。その際の出力である $f(x_A, \dot{x}_A)$ は,入力が遊隙 L を超えた部分に対してのみ値を持つため,図 5-2 下段のような波形になる。ちょうど接触が始まる位相を接触位相角 α と名づける。 α を境に切り取られた出力波形を次式で近似する。

 $f(x_A, \dot{x}_A) \simeq R_1 \sin(\omega t + \theta) + c_1$ (7) 出力振幅 R_1 と直流分 c_1 は,フーリエ展開した1次項として 得られ,それぞれ α の関数となる。式(7)及び式(6)を式(5)に代 入することにより,接触位相角 α と外力振動数 ω についての 式が得られる。その式から α を解析的に求めることは難しい が,数値的な計算を用いて α を定めれば,最大振幅 $D_A(\omega)$ は 次式のように得られる。

(i) 0 < α < π に α の 解 が 存在 する 場合

$$D_{A}(\omega) = \frac{\pi\omega_{A}^{2} + \omega_{c}^{2}(\sin\alpha - \alpha\cos\alpha) + 2h_{c}\omega_{c}\omega(\cos\alpha - 1)}{\pi\omega_{A}^{2}\cos\alpha - \omega_{c}^{2}(\sin\alpha - \alpha\cos\alpha) - 2h_{c}\omega_{c}\omega(\cos\alpha - 1)}L$$

(ii) 0 < α < π に α の解が存在しない場合

$$D_{A}(\omega) = \frac{A}{\sqrt{\left(\omega_{A}^{2} - \omega^{2}\right) + \left(2h_{A}\omega_{A}\omega\right)^{2}}}$$
(8)

TypeA, TypeC でも、TypeB と同様に、運動方程式から、接触位相角 α と外力振動数 ω に関する式が得られ、その式から最大振幅 $D_A(\omega)$ あるいは $D_B(\omega)$ を求めることができる。

以上のようにして求めた共振曲線の理論解を数値解析解 と比較する。表 5-1 に示す A モデルと B モデルの連結を考 え,連結形態を図 5-1 のように定める。TypeA, TypeB, TypeC それぞれにおいて,連結部の遊隙 L を 1.0[cm],粘性減衰係 数 cc を 0.5[kN's/cm]で一定にしたまま,遊隙部材の剛性 kc の値のみを 3 パターンに変化させた場合,TypeA については 図 5-3, TypeB については図 5-4, TypeC については図 5-5 の ような共振曲線が得られる。3 図ともに連結部の剛性が高い 場合は系の非線形性が強くなり,式(6)の仮定による影響で数 値解析解との誤差が若干大きくなるが,十分に許容できる誤 差範囲である。また,TypeA の図 5-3 において顕著に現れて いるように,連結部の剛性が高くなるにつれ共振曲線は高振 動数側へ大きく傾いてゆく。数値解析解は初期条件を 0 とし た場合の解であるために,山の途中でジャンプする形となる が,途中までの経路を評価すれば誤差はほとんどない。

表 5-1 建物モデル

	質量	剛性	減衰定数
Model A	m _A =100 [ton]	k _A =100 [kN/cm]	h _A =0.03
Model B	m _B =100 [ton]	k _B =200 [kN/cm]	h _B =0.03



5.2 **等価線形式の誘導**

TypeA 両側固定連結系を例に,等価線形式の誘導法を説明 する。前節で求めた共振曲線式と,共振点における条件,

$$\frac{D_A(\omega)}{2\omega} = 0 \tag{9}$$

を用いることにより,共振点における接触位相角αの条件式 が得られる。連結部非減衰の場合は以下のような式となる。

$$4h_{A}^{2}\omega_{A}^{2}\left(\omega_{A}^{2}+\frac{2\alpha-\sin 2\alpha}{\pi}\omega_{c}^{2}\right)=\left(\frac{A\cos\alpha}{L}\right)^{2}$$
(10)

式(10)からαを求めれば, 共振振動数 ω_{peak} 及び共振振幅 D_{peak} は次式のように定まる。

$$\omega_{peak}^{2} = \omega_{A}^{2} + \frac{2\alpha - \sin 2\alpha}{\pi} \omega_{c}^{2} - 2h_{A}^{2} \omega_{A}^{2}$$
(11)

$$D_{peak} = \frac{L}{\cos \alpha} \tag{12}$$

さらに等価線形剛性 K_{eq} と等価粘性減衰 C_{eq} は,

$$K_{eq} \simeq m_A \omega_{peak}^2 - k_A \tag{13}$$

$$C_{eq} \simeq \frac{m_A \alpha}{\omega_{peak} D_{peak}} \tag{14}$$

のように定めることができる。しかしながら,式(10)からα を得るためには数値的な計算が必要となるため,αを含んだ 項を多項式で近似することにより解析解を導く。式(10)にお いて、

$$\beta = \cos \alpha \tag{15}$$

$$B(\alpha) = \frac{2\alpha - \sin 2\alpha}{2\alpha} \tag{16}$$

と定義し, $B(\alpha)$ を β の2次関数として近似すれば、次のような係数が得られる。

$$B(\beta) \simeq B_{0} + B_{1}\beta + B_{2}\beta^{2}$$
(17)
$$\hbar \pi \hbar^{3} U, \quad \begin{cases} B_{0} \\ B_{1} \\ B_{2} \end{cases} \simeq \begin{cases} 1.01644 \\ -1.45968 \\ 0.41291 \end{cases}$$

式(15)~式(17)により,式(10)はβについての2次方程式と なるため,βについて解析的に解くことができ,さらには 式(11)~式(14)も解析的に導くことができる。以上のように 適時で多項式近似を用いることにより,TypeA両側固定連結 系の等価線形式は次式のように求まる。

$$\overline{K_{eq}} = \overline{k_c} \left(B_{10} + B_{11}\beta + B_{12}\beta^2 \right)$$

$$\overline{C_{eq}} = \frac{\overline{L}}{\sqrt{1 + (B_{10} + B_{11}\beta + B_{12}\beta^2)\overline{k_c}}} \left\{ \frac{\beta - (B_{30} + B_{31}\beta + B_{32}\beta^2)\overline{k_c}}{1 + (B_{30} + B_{31}\beta + B_{32}\beta^2)\overline{k_c}} \right\} - 1 (18)$$

$$\hbar z \hbar z \cup ,$$

$$\begin{aligned} \overline{K_{eq}} &= \frac{K_{eq}}{k_A}, \quad \overline{C_{eq}} &= \frac{C_{eq}}{c_A}, \quad \overline{k_c} &= \frac{k_c}{k_A}, \quad \overline{L} &= \frac{A}{2h_A\omega_A^2 L}, \quad \overline{c_c} &= \frac{c_c}{c_A} \end{aligned}$$

$$\beta &= \frac{-B_b - \sqrt{B_b^2 - 4B_a B_c}}{2B_a}$$

$$B_a &= B_{12} \left(\overline{k_c} + 2\overline{c_c}\right) + B_{22} \left(2\overline{k_c} \overline{c_c} + \overline{c_c}^2\right) + B_{32} \overline{k_c} \overline{c_c}^2 - \overline{L}^2$$

$$B_b &= B_{11} \left(\overline{k_c} + 2\overline{c_c}\right) + B_{21} \left(2\overline{k_c} \overline{c_c} + \overline{c_c}^2\right) + B_{31} \overline{k_c} \overline{c_c}^2$$

$$B_c &= B_{10} \left(\overline{k_c} + 2\overline{c_c}\right) + B_{20} \left(2\overline{k_c} \overline{c_c} + \overline{c_c}^2\right) + B_{30} \overline{k_c} \overline{c_c}^2 + 1$$

$$B_{11} = \left\{ \begin{array}{c} 1.01644\\ -1.45968\\ B_{11}\\ B_{12} \end{array} \right\} \approx \left\{ \begin{array}{c} 0.97130\\ -2.28823\\ 1.33366 \end{array} \right\}, \quad \left\{ \begin{array}{c} B_{30}\\ B_{31}\\ B_{32} \end{array} \right\} \approx \left\{ \begin{array}{c} 0.87659\\ -2.38670\\ 1.54941 \end{array} \right\}$$

式(18)を簡単に表記すると,次式のような形になる。 <TypeA 両側固定連結系の等価線形式>

$$\overline{K_{eq}} = \Phi_A \left(\overline{k_c}, \overline{c_c}, \overline{L} \right), \quad \overline{C_{eq}} = \Gamma_A \left(\overline{k_c}, \overline{c_c}, \overline{L} \right)$$
(19)

$$\begin{array}{c} \overline{K_{eq}} = \frac{K_{eq}}{k_A}, \quad \overline{C_{eq}} = \frac{C_{eq}}{c_A} \\ \overline{k_c} = \frac{k_c}{k_A}, \quad \overline{L} = \frac{A}{2h_A\omega_A^2 L}, \quad \overline{c_c} = \frac{c_c}{c_A} \end{array}$$

式(19)のように、等価線形剛性と減衰は、剛性に関するパラ メータ $\overline{k_c}$ 、減衰に関するパラメータ $\overline{c_c}$ 、遊隙に関するパラ メータ \overline{L} 、計3つのパラメータの関数として一般化される。 ここに、入力レベルAは遊隙Lと同一パラメータにまとめら れており、例えば、入力レベルを2倍にすることと遊隙を半 分にすることが等価線形式において同義であることを意味 する。TypeA と同様にして、TypeB の等価線形式は以下のよ うな形式で導かれる。

<TypeB 片側固定連結系の等価線形式>

$$\overline{K_{eq}} = \Phi_B\left(\overline{k_c}, \overline{c_c}, \overline{L}\right), \quad \overline{C_{eq}} = \Gamma_B\left(\overline{k_c}, \overline{c_c}, \overline{L}\right)$$
(20)
$$\overline{K_{eq}} = \frac{K_{eq}}{k_A}, \quad \overline{C_{eq}} = \frac{C_{eq}}{c_A}$$

$$\overline{k_c} = \frac{k_c}{k_A}, \quad \overline{L} = \frac{A}{2h_A\omega_A^2 L}, \quad \overline{c_c} = \frac{c_c}{c_A}$$

TypeC の場合,解析的に等価線形式を求めることは困難とな る。そこで,TypeA, TypeB の等価線形式を参照しつつ,連 結系の諸元の変化に対して値の変化が少ないパラメータ,つ まり等価線形式を一般化できるようなパラメータを予測し た上で,数値的な検証を行うことによりこれを定める。その 結果得られた等価線形式は,次式で表される。

<TypeC2棟連結系の等価線形式>

$$\overline{K_{eq}} = \Phi_B\left(\overline{k_c}, \overline{c_c}, \overline{L}\right), \quad \overline{C_{eq}} = \Gamma_B\left(\overline{k_c}, \overline{c_c}, \overline{L}\right)$$
(21)
$$\mathcal{T}_c \mathcal{T}_c \mathcal{T}_c$$

$$\overline{K_{eq}} = \frac{K_{eq}}{k_A} + \frac{K_{eq}}{k_B}, \quad \overline{C_{eq}} = \frac{C_{eq}(\omega_A + \omega_B)}{c_A \omega_B + c_B \omega_A}$$
$$\overline{k_c} = \frac{k_c}{k_A} + \frac{k_c}{k_B}, \quad \overline{c_c} = \frac{c_c(\omega_A + \omega_B)}{c_A \omega_B + c_B \omega_A}$$
$$\overline{L} = \frac{A}{2h_A \omega_A^2 L} \sqrt{\frac{(\omega_B^2 - \omega_A^2)^2 + (2h_B \omega_B - 2h_A \omega_A)^2 \omega_A^2}{(\omega_B^2 - \omega_A^2)^2 + (2h_B \omega_B)^2 \omega_A^2}}$$

式(21)の関数は TypeB 片側固定連結系の場合と同じであり, パラメータの内容を入れ替えたものである。

5.3 遊隙連結系の応答制御法

前章で得られた等価線形式を用いて応答制御効果を検証 する。図 5-6 のような 2 棟モデルを,遊隙部材によって連結 する。先ず, 2 棟を線形バネ K_{eq} と粘性ダンパー C_{eq} で連結し た系を想定し,式(21)における $\overline{K_{eq}}$, $\overline{C_{eq}}$ を軸として,図 5-7 のような応答制御率(非連結時の最大共振ピーク値 D_0 に対 する連結時の最大共振ピーク値 D_c の比率)の等高線を描く。 図 5-7 から応答制御し得る $\overline{K_{eq}} \geq \overline{C_{eq}}$ を選び出し、それに対 応する遊隙部材を式(21)により定めれば、効果的な遊隙部材 を特定することができる。例として,図 5-7 における Case1, Case2 の 2 点を選んで検証する。Case1 は $\overline{K_{m}} \simeq 0.15$, $\overline{C_{m}} \simeq 2.0$ に対応しており, 0.45 倍の応答制御効果が期待される。Case2 は $\overline{K_{eq}} \simeq 0.75$, $\overline{C_{eq}} \simeq 0.35$ に対応しており, 1.0 倍の応答制御 効果を期待される。ここで、式(21)によれば、遊隙に関する パラメータ Lを 20 と固定した場合,図 5-8 のような等価線 形図を描くことができる。図 5-8 により Case1 に対応する遊 隙部材は $\overline{k_c} \approx 0.5$, $\overline{c_c} \approx 7$, $\overline{L} = 20$, Case2 に対応する遊隙部 材は $\overline{k} \simeq 4$, $\overline{c} \simeq 5$, $\overline{L} = 20$ という値が定まる。求められた 遊隙部材の諸量を用いて、Case1、Case2 それぞれについて共 振曲線を数値解析により描くと図 5-9 が得られる。Case1 に おいては 0.45 倍の応答制御率が達成され, Case2 は 0.9 倍の 応答制御率が達成されている。以上の2点に限らず、指定応 答制御率と達成応答制御率は 10%以内のばらつきに収まる ことが確認され、等価線形化の精度と応答制御予測の妥当性 が検証された。



 $k_A = 100 \text{ [kN/cm]}$ $W_B = 1960 \text{ [kN]}$ $k_B = 300 \text{ [kN/cm]}$ $h_A = h_B = 0.03$ 地動加速度 A = 20 [gal]

 $W_{A} = 980 \, [\text{kN}]$





図 5-7 等価線形連結系の応答制御率



6. 連結部材

連結による応答低減効果を得るためには,建物剛性の半分 程度の剛性を持つ部材が必要である。また,実際の連結を考 えれば,連結部材と建物の接着は引張よりも圧縮の方が施工 しやすい。これらのことを踏まえるなら,具体的な連結部材 材料としては,実験で用いたウレタンや序論中で述べた古タ イヤなどが候補にある。本章では,これらの材料を連結部材 として用いたときの実寸法を次の要領で試算してみる。

6.1 連結部材の必要剛性

本論で対象としている建物は、都市密集地域に建つ古い住 宅であるが、これら住宅の一次固有周期は0.5 秒程度である ことがわかっている。文献¹⁷⁾によると、多雪地ではない一般 地の重い屋根の平屋で、1 階床と基礎の重量を含まない場合 の重量は約0.50tonf/m²、2 階建ての場合は約0.75tonf/m²であ る。2 間半×5 間程度の小規模住宅を考えると、その面積は 40~50m² であるから、建物重量は20~30tonf(200~300kN) 程度となる。固有周期を0.5 秒とすると、建物の剛性は3322 ~4834kN/m となる。従って、この値の半分程度の剛性であ る2000kN/mが、連結部材に要求される剛性のめやすとなる。 6.2 連結部材の必要寸法

実験で用いたウレタン(10×10×10cmの塊)の剛性は表 4-2 を参照すれば 9.0 kN/m 程度なので,同じ厚さ 10cm のウレタ ンを使用するなら,220 個分つまり 2.2m²程度の面積があれ ば必要剛性を満たすことになる。また古タイヤの剛性につい ては,おおよその値を知ることを目的として,バイク用(厚 さ80mm)と普通自動車用(厚さ200mm)の二種類について 圧縮載荷実験を行った結果, それぞれ 20kN/m, 150kN/m 程 度の剛性を持つことがわかった。バイク用であれば100個程 度, 普通自動車用であれば十数個の古タイヤを建物間に装着 すれば、それなりの地震応答の低減効果を発揮することにな る。

7. まとめ

本研究では,兵庫県南部地震における最大の教訓であるは ずの都市部老朽住宅の耐震改修について, それが一方で希求 されているにも関わらず, 他方その実行が遅々として進まな い理由を、「高すぎるから」、「高望みしすぎるから」と看 破し,「高望みしないかわりに,安くそしてすぐに実現でき る耐震改修法」を提案することを目的とし、 遊隙を持つ部材 による建物間の連結制震効果を実験的・解析的に検証した。

安価な連結部材とするためには片側接着が必至であり,連 結部材(部分)に遊隙がある状態を考えなければならない。 そのため、振動系は強非線形性を持つことになる。本研究で は、この非線形性を実験により確認するとともに、その振動 状態を理論的に等価線形化することで, 圧縮にも引張にも効 く高価な連結部材に関する既存の理論を適用できることも 示した。

これら一連の研究の結果,序論で述べたような古タイヤや ウレタン材といった安価な材料を建物間に挟むだけでも, そ れなりの制震効果が期待できることがわかった。

【付録 遊隙連結解析方法】

ゴム連結の場合を想定して以下に数値解析手法を説明す る。時刻歴応答解析には Newmark β法(β=1/4)を用いた。 ゴム剛性及び建物剛性は線形として取り扱うが、ゴムがたる んだ状態から張った状態へ移行する瞬間、またはその逆の瞬 間に系剛性が急変する。複数棟を連結する場合であれば、系 剛性の変化が 0.01 秒間に数回以上生じることもあるため、 連結ゴムに張力が生じる瞬間の時刻を厳密に見極めなけれ ばならない。その収束判定法は以下の通りである。ゴムで連 結された2質点の質点間距離の時間変化を図に示す。質点間 距離がちょうどゴム長となる時刻を「真の収束時刻」とする。 まず,時刻 t₁の質点間距離と t₁+Δt 秒後の質点間距離を直線 で結び、この直線とゴム長の直線との交点の時刻を算出する。 これを第1段階の「仮の収束時刻」 $t_1 + \Delta t_A$ とする。「真の収 束時刻」を越えない時刻 t₁+ 0.7Δt から,時間刻み幅をそれま での 1/10 として第2段階の判定を行う。第1段階と同じ手 順で,第2段階の「仮の収束時刻」t₂+Δt_Bを算出する。第3 段階の判定では、時間刻み幅をさらに 1/10 にし、開始時刻 は t₂+0.9Δt_Bとする。このように時間刻み幅を徐々に細かく しつつ同手順を繰り返すことで、「仮の収束時刻」を「真の

収束時刻」に漸近させる。第n段階の「仮の収束時刻」にお ける質点間距離とゴム長との差が 1.0×10⁻¹⁰mm 以下になっ たときを最終的な収束時刻とする。ただし、このような可変 時間刻みによる時刻歴応答解析には連続的な入力データが 必要である。離散的に与えられる記録地震波を連続的なデー タに補間するため、本解析では3次スプライン関数を採用し、 精度向上を図った。



く参考文献>

- 阪神・淡路大震災調査報告総集編,日本建築学会,2000.3
- 震災対策国際総合検証事業報告,第5巻,兵庫県震災対策国際総合検証 2) 会議, 1999
- 今泉晋:既存建築物の耐震診断・改修の歩みと実績,建築防災,2000.1
- 4) 既存建築物耐震診断・改修等推進全国ネットワーク委員会平成 13 年度第 1回全体委員会開催報告,既存建築物耐震診断・改修等推進全国ネットワ -ク委員会事務局,建築防災,2001.9
- 耐震改修の現状,国土交通省住宅局建築物防災対策室,2001.2
- 篠原達巳,諸岡繁洋,中島正愛:ロープで連結された建物群の振動性状, 6) 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.269~270, 2001.9 篠原達已,小林真帆,御澤昇明,中川徹,諸岡繁洋,中島正愛ほか:高
- 7) 知能建築構造システムに関する日米共同構造実験研究(その38~その41) 遊隙をもつ連結材でつないだ建物群の震動台実験と応答評価、日本建築学 会大会学術講演便概集, pp.899~906, 2002.8 蔭山満,安井譲,背戸一登:連結制振の基本モデルにおける連結パネと
- 8) ダンパーの最適解の誘導,日本建築学会構造系論文集,第 529 号, pp.97 ~104, 2000.3
- 蔭山満,安井譲,背戸一登:多モード連結制振を対象とした連結バネと ダンパーの最適配置に関する研究,日本建築学会構造系論文集,第538号, pp.79~86, 2000.12
- 10) 蔭山満, 安井譲, 背戸一登:連結制振におけるダンパの最適配置に関す る研究,日本機械学会論文集(C編)65巻 630 号, pp.535~543, 1999.2) 小堀鐸二,佐藤邦昭,山田俊一ほか:弾塑性型ジョイント・ダンパーに
- 11) 関する研究,日本建築学会大会学術講演梗概集,pp.589~596,1988.10 12) 宮川伸幸,小堀鐸二,山田俊一ほか:ジョイントダンパを用いた構造物
- の設計法に関する研究(その1:並列2棟モデルによる検討), pp.959~ 960, 1990.10
- 13) 曽田五月也, 近藤一平,渡辺聡:剛柔構造物間に減衰装置を設けた高層 **建物の振動性状に関する理論的研究,第7回日本地震工学シンポジウム論**
- 文集, pp.1579~1584, 1986.11
 14) 岩浪孝一, 鈴木浩平, 背戸一登:並列構造物の制振に関する研究, 日本 機械学会論文集(C編) 52 巻 484 号, pp.3063~3072, 1986.12
 15) 岩浪孝一, 鈴木浩平, 背戸一登:ダンパとパネで連結された並列構造物
- の制振法,日本機械学会論文集 (C 編) 59 巻 566 号, pp.2975~2980, 1993.10
- 16) 井川望,山田祐司,横山浩明ほか:2 棟連結による制震(振)システム に関する研究,日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.921~924, 1992.8
- 17) 小規模建築物基礎設計の手引き,日本建築学会

<研究協力者>

篠原達巳	京都大学大学院工学研究科	大学	院生
御澤昇明	関西大学大学院工学研究科	大学	院生
小林真帆	神戸大学大学院自然科学研究	科	大学院生
中川 徹	名古屋工業大学 大学生		